

## 7 КОНВЕРЗИЈА И АКУМУЛАЦИЈА ЕНЕРГИЈЕ СУНЦА И ВЕТРА

Због периодичности рада конвертора енергије (ветрогенератора, фотонапонских ћелија и соларних колектора), условљених временским приликама, добом дана односно године, неопходно је добијену енергију конвертовати и акумулирати да би се омогућило трошење и при неповољним условима. Конверзија и акумулација енергије је нарочито битна уколико се конвертори користе у специфичним услови где не постоји могућност повезивања на електродистрибутивну мрежу, као на пример: сеоска домаћинства, викендице, војни објекти, телекомуникациони репетитори и сл.

Основни вид енергије који се добија коришћењем ветрогенератора и фотонапонских ћелија је електрична енергија, док се применом соларних колектора добија топлотна енергија. Сходно томе, могу се разматрати и два основна вида акумулације енергије, акумулација електричне, односно топлотне енергије.

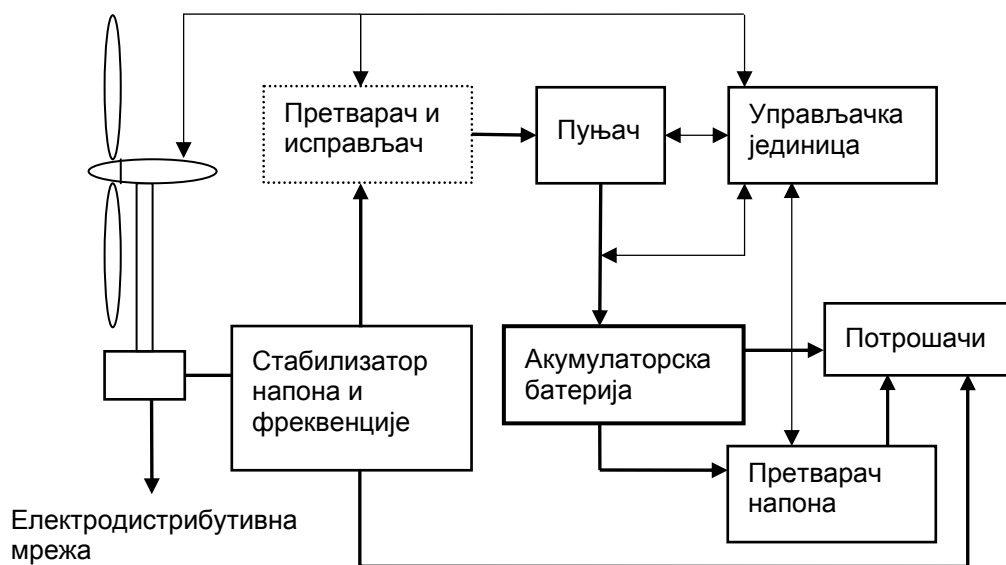
### 7.1 Акумулација електричне енергије

Електрична енергије се може акумулирати на два начина, непосредно и посредно. Непосредна акумулација претпоставља коришћење акумулаторских батерија (уз примену електричних претварача и стабилизатора), док посредно складиштење претпоставља електролизу воде и складиштење водоника и кисеоника који се према потреби могу поново конвертовати у електричну енергију у горивним галванским спреговима.

#### 7.1.1 Непосредна акумулација електричне енергије

За акумулацију електричне енергије произведене ветрогенератором или фотонапонским ћелијама углавном се користе секундарни електрохемијски извори енергије (акумулатори). Данас је у употреби већи број различитих типова акумулатора:

Код ветрогенератора електрична енергија се може добити у два вида у зависности од примењеног електричног генератора, као наизменична и једносмерна струја различитих напона. У зависности од типа генератора зависиће и принципијелна шема периферних јединица при акумулацији енергије. На слици 7.1 је приказана принципијелна шема са основним периферним јединицама неопходним за коришћење енергије ветра.



Слика 7.1. Шематски приказ периферних јединица за коришћење и акумулацију електричне енергије добијене из ветрогенератора.

С обзиром на то да се коришћењем генератора наизменичне струје смањују губици, употреба једносмерних генератора је веома ограничена. Сходно томе, идеално би било користити наизменичне генераторе напона 220 V, фреквенце 50 Hz, чиме се омогућава и директно коришћење произведене електричне енергије у периодима са повољним ветром. Међутим, због различитих периферних брзина ротирања крила ветрењаче при различитим брзинама ветра потребно је фреквенцу одржавати у границама блиским 50 Hz. То се може остварити применом зупчастих редуктора или електронским стабилизаторима напона и фреквенције.

Овако добијена стабилисана енергија се директно може користити од стране потрошача, или предавати у електроенергетски систем електродистрибутивне мреже. Уколико се енергија складишти у акумулаторима, неопходно је преко претварача и исправљача превести у једносмерну струју са потребним напонам за пуњење акумулаторских батерија (у случају коришћења генератора једносмерне струје претварачко-исправљачка јединица се у принципу може изоставити, али је потребно користити генератор са напонам потребним за пуњење акумулатора).

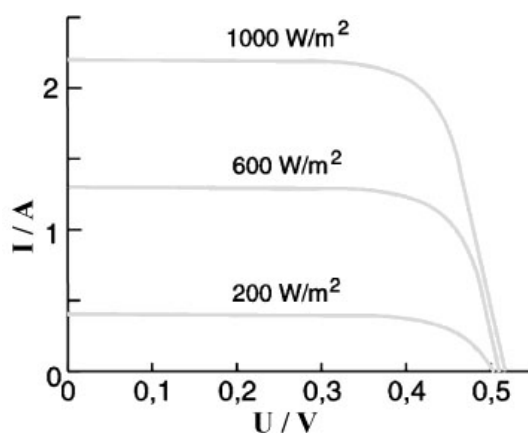
Уобичајено је да се акумулаторске батерије намењене оваквој примени везују комбиновано редно-паралелно да би се добио напон од 48 V са потребним капацитетом. Након претварача и исправљача, акумулатори се пуне помоћу пуњача који у себи садржи електронски склоп који спречава како препуњавање тако и недозвољено пражњење (дубоко пражњење) који у многоме скраћују радни век односно број циклуса акумулаторских батерија.

Акумулисана енергија се према потреби користи, али преведена у наизменичну струју напона 220 V, 50 Hz, за шта се користи претварач напона. За неке примене као што су осветљење, рад неких електронских уређаја (ТВ, радио пријемници, рачунари и сл.) може се директно користити електрична енергија из акумулаторске батерије, при чему се потребан напон може по жељи мењати једноставним преспјањем ћелија акумулаторских батерија. На пример, изводи на 6, 12 или 24 V.

Управљачка јединица, која ради на принципу повратне спреге и која се сада углавном производи на бази електронских процесора, има улогу усаглашавања рада свих елемената ветрогенератора, као што су подешавање корака елисе ради стабилности рада, праћење пуњења, пражњења и допуњавања акумулатора, пребацивање потрошње или из акумулаторских батерија или директно из ветрогенератора, праћење и ограничавање потрошње да би се спречило оштећење система и сл.

**Фотонапонски претварачи** (соларне ћелије) претварају директно енергију сунчевог зрачења (радијација) у електричну енергију у облику једносмерне струје ниског напона. Напон соларне ћелије зависи од материјала ћелије и јачине радијације.

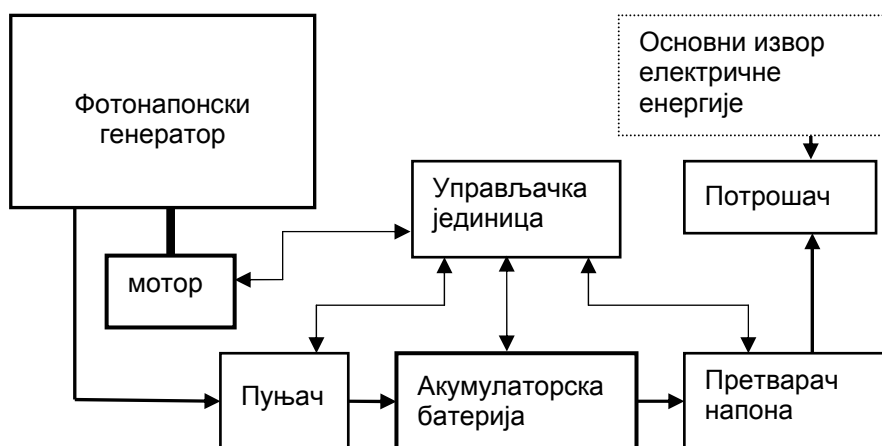
Данас је уобичајена примена силицијумских соларних ћелија чија је ефикасност од 15 до 20 %, а напон је типично око 0.4 V. На слици 7.2 је приказан дијаграм струјно-напонске карактеристике у зависности од јачине радијације за силицијумску соларну ћелију површине 100 cm<sup>2</sup>. Са слике се може видети да електрична енергија коју може да обезбеди овакав тип соларне ћелије варира од радијације и креће се у границама од 2 до 8 mW cm<sup>-2</sup>.



Слика 7.2. Струјно-напонска карактеристика силицијумске фотонапонске ћелије површине  $100 \text{ cm}^2$  при различитим интензитетима сунчевог зрачења

Према томе, за неку реалну потрошњу од  $2 \text{ kWh}$ , уз просечну радијацију од  $\sim 500 \text{ W/m}^2$ , било би потребно инсталирати фотонапонски претварач површине  $50 \text{ m}^2$ . Са обзиром на тренутно релативно високу цену соларних ћелија од  $3\text{-}5 \text{ \$/W}$  инвестициони трошкови превазилазе буџет просечног домаћинства. Према томе, фотонапонске ћелије се реално могу користити за додатну акумулацију енергије, уз примену ветрогенератора и соларних колектора.

На слици 7.3 је приказана принципијелна шема са основним периферним јединицама неопходним за коришћење фотонапонских генератора електричне енергије.



Слика 7.3. Шематски приказ периферних јединица за коришћење и акумулацију електричне енергије добијене из фотонапонског генератора.

У принципу, уз коришћење  $48 \text{ V}$  акумулаторског блока, напон фотонапонског генератора треба да износи  $65 \text{ V}$ , да би се обезбедило пуњење акумулаторске ћелије до  $2.7 \text{ V}$ . Управљачка јединица у овом случају има поред раније датих функција и функцију ротирања фотонапонског генератора помоћу мотора, ради обезбеђивања положаја са најбољом осунчанашћу.

Према горе изложеном, за аутономно електрично напајање објекта, при чему се подразумева да су инсталирани соларни колектори за загревање и акумулацију топлотне енергије и коришћење чврстог или гасовитог горива за загревање и кување, потребно је користити

комбинацију ветрогенератора и фотонапонског генератора. У случајевима када се електрични уређаји и апарати не могу напајати из ветрогенератора или фотонапонских генератора, неопходно је обезбедити напајање помоћу акумулаторског блока у трајању од 10 до 15h. Као пример потребне снаге ветрогенератора и фотогенератора потребно је претпоставити укупну потрошњу појединих уређаја и апарата на часовном и месечном нивоу.

Од просечне месечне потрошње од ~ 340kWh за фрижидер, замрзивач, телевизијски и радио пријемник и осветљење се мора обезбедити константно напајање, односно око 0.6kWh. При томе струја коју је потребно да испоручи акумулаторски блок од 48V у току 10 до 15h износи 12.5A, односно око 15A уколико би се користили и неки други апарати са мањом потрошњом. На основу овога се може израчунати да је енергија коју је потребно да обезбеди акумулаторски блок у трајању од 15h приближно 10kWh.

Уколико се користе аутомобилски акумулатори 12V, 45Ah, као најдоступнија и најисплативија варијанта, такав акумулаторски блок се може формирати редном везом од 4 акумулаторске батерије које би се паралелно везале у 5 истоветних блокова, што укупно чини 20 акумулаторских батерија. Потребно је напоменути да такав акумулаторски блок може дати и знатно веће струју, односно снагу, у току краћег времена.

На основу укупне потрошње од ~6kW уз претпоставку да су сви апарати и уређаји укључени, може се претпоставити потребна снага ветрогенератора и фотонапонског генератора, којим се могу напајати уређаји и допуњавати акумулаторски блок. Уколико би се користио генератор наизменичне струје напона 220V потребна струја би износила ~27A. Пошто се користи напон од 220V, а потребна струја за допуњавање потпуно испразњеног акумулаторског блока износи максимално ~20A уз напон од 65V, удео снаге за пуњење акумулаторског блока би износио максимално 1.3kW. То значи, пошто се користи трансформаторска јединица, да ће струја на примару која се троши за пуњење акумулатора износити максимално 6A.

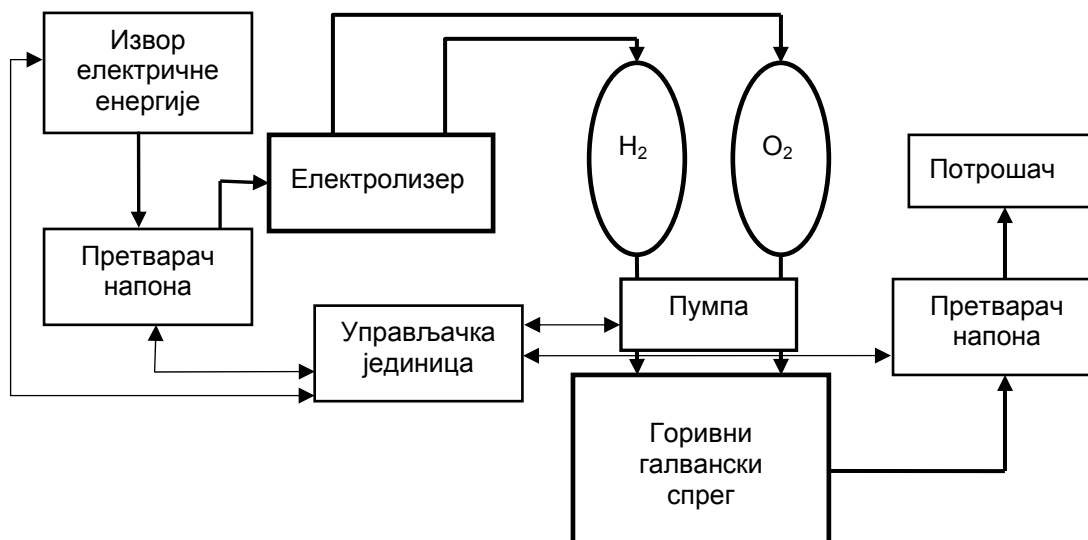
Према томе, оптималне карактеристике ветрогенератора који би могао да обезбеди напајање свих горе наведених уређаја и пуњење акумулаторског блока би биле 220V, 30A уз снагу од око 6kW (рачунајући и губитке у електронским склоповима, водовима, степену ефикасности пуњења акумулатора и сл.). При томе треба напоменути да би управљачка јединица смањивала снагу ветрогенератора, преко промене угла елисе, у зависности од потрошње. Фотонапонски генератор би у овом случају служио само за допуњавање акумулаторског блока и његове снага би реално износила око 650W, са струјом од 10A и напоном од 65V.

### **7.1.2 Посредна акумулација електричне енергије**

Посредна акумулација електричне енергије подразумева коришћење примарно добијене електричне енергије из ветрогенератора или фотонапонских генератора, за електролизу воде (30% раствор KOH) којом се добијају гасовити водоник и кисеоник према реакцијама:



Добијени гасови се складиште у резервоарима и по потреби претварају у електричну енергију уз примену горивних галванских спрегова. Шематски приказ система за посредно коришћење електричне енергије је приказан на слици 7.4.



Слика 7.4. Шематски приказ система за посредну акумулацију електричне енергије

Извор електричне енергије као и у случају непосредне акумулације може бити како ветрогенератор тако и фотонапонски генератор. Претварач напона има улогу двојаку улогу у зависности од извора који се користи. Уколико се примарно добија наизменична струја (из ветрогенератора), претварач има улогу снижавања и претварања напона у једносмерни са потребном вредношћу за електролизу. У електролизеру се разлаже вода на водоник и кисеоник према једначинама 7.1 и 7.2, који се даље складиште у резервоарима. Управљачка јединица према потреби ставља у функцију ГГС који даје једносмерни напон, који се у претварачу преводи у наизменични напон 220V.

#### **Горивни галвански спрегови (Fuel cells)**

Горивни галвански спрегови (ГГС), популарно названи горивне ћелије, су електрохемијски системи који конвертују потенцијалну, хемиску енергију горива директно у електричну енергију у облику једносмерне струје ниског напона. ГГС припадају групи примарних електрохемијских извора електричне енергије али са спољашњом акумулацијом електроактивних супстанци. Укупна електрохемијска реакција одговара сагоревању горива, али због просторне одвојености долази до усмереног протока електрона, кроз спољно електрично коло (као потрошача), од аноде ка катоди и појаве електричне струје. Са друге стране, електрични баланс се успоставља усмереним кретањем јона кроз електролит. Основне предности и мане ГГС у поређењу са другим изворима електричне енергије су:

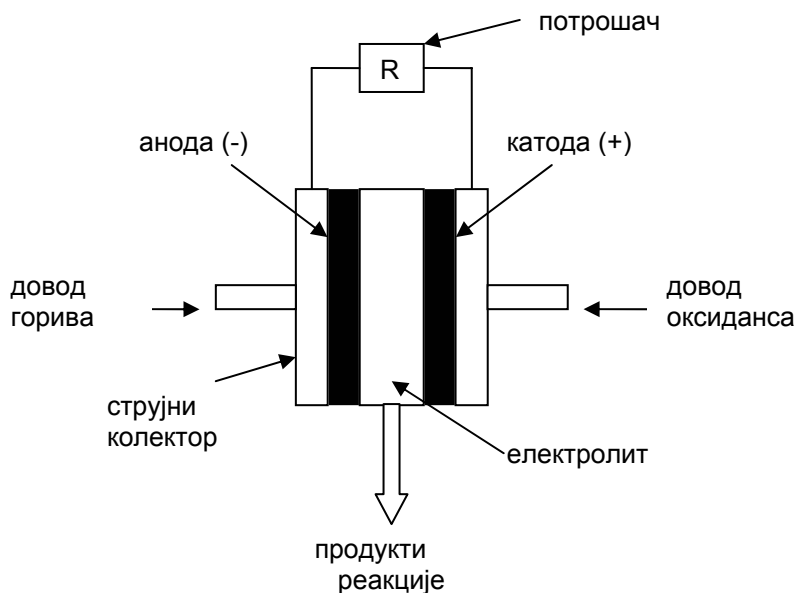
##### предности:

- директна конверзија енергије,
- велики избор горива,
- коришћење кисеоника из ваздуха,
- могућност когенерације,
- нема помичних делова,
- тих рад,
- модуларна конструкција,
- висока ефикасност,
- брзо одавање енергија,
- флексибилност величине,

##### мане:

- високи инвестициони трошкови,
- већина је у фази развоја,
- мало података о стабилности рада,
- технолозија недовољно позната произвођачима енергије,
- непостојећа инфраструктура,
- коришћење племенитих метала

Основне компоненте ГГС су анода (негативна електрода, на којој се оксидише гориво); катода (позитивна електрода, на којој се редукује оксидационо средство, обично кисеоник) и електролит, као што је шематски приказано на слици 7.5.



Слика 7.5. Шематски приказ горивног галванског спрега

Поред основних делова ГГС имају и спољашње јединице, резервоаре за складиштење горива, пумпе за напајање ГГС горивом и оксидансом, одводе производа реакције, контролне јединице за регулацију протока и притиска горива и оксиданса, хладњаке за одвођење топлоте, и сл.

Основни типови ГГС се могу поделити према радној температури на ниско ( $t < 250^{\circ}\text{C}$ ) и високо температурне ( $t > 300^{\circ}\text{C}$ ). Према врсти електролита ГГС се деле на:

- полимер електролитне (polymer electrolyte fuel cell, ПЕФЦ)
- алкалне (alkaline fuel cell, АФЦ)
- фосфорно киселинске (phosphoric acid fuel cell, ПАФЦ)
- растопљено карбонатне (molten carbonate fuel cell, МЦФЦ)
- оксидно керамичке (solid oxide fuel cell, СОФЦ).

У Табели 7.1 је дата подела ГГС према врсти електролита са основним радним карактеристикама.

Табела 7.1. Подела и основне карактеристике ГГС.

Тип ГГС	Електролит	Температура $^{\circ}\text{C}$	Притисак бар	Ефикасност %
ПЕФЦ	полимерна мембрана NAFION-117 <sup>®</sup>	80 – 110	~4	60-65
АФЦ	30-80% КОН	80	1 - 5	50-60
ПАФЦ	100% фосфорна-киселина	200	1 - 10	40
МЦФЦ	Li/K-CO <sub>3</sub>	650	1 - 10	48-56
СОФЦ	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>	1000	~1	55-65

Из горње таблице се може видети да ГГС са полимерном мембраном (ПЕФЦ) и на бази чврстих оксида (СОФЦ) имају највиши степен конверзије енергије (ефикасност).

Као гориво у ГГС могу се користити различите супстанце (метан, етан, метанол, етанол, земни гас и сл.), али се водоник због свог високог специфичног теоријског капацитета од  $26,8 \text{ A h g}^{-1}$ , као и лоше ефикасности ГГС при раду са набројаним супстанцама, сматра горивом избора за већину ГГС.

Још једна велика предност употребе водоника је то што је једини продукт реакције вода (осим у случају МЦФЦ), тако да је он и најприхватљивије гориво са становишта смањења емисије гасова стаклене баште. Извор водоника може бити електролиза воде, реформинг процес метанола и сл. Као оксиданс код свих типова ГГС користи се кисеоник, као чист или из ваздуха.

У табели 7.2 дате су анодне и катодне реакције, материјали који се употребљавају за израду аноде и катоде, као и основне струјно напонске карактеристике различитих врста ГГС. Као катодни и анодни материјали углавном се користе племенити метали и њихове легуре нанети на носач од активног угља или графита (код ПЕФЦ, ПАФЦ), односно користе се пресовани порозни катализатори на бази метала и оксида метала (код АФЦ, МЦФЦ и СОФЦ).

Из таблице се такође може видети да ПЕФЦ и СОФЦ остварују између  $0,3\text{--}0,4 \text{ Wcm}^{-2}$ , при напонима од  $0,65\text{--}0,80 \text{ V}$ , док остали типови имају нешто лошије електричне карактеристике.

Табела 7.2. Основне реакције у ГГС, материјали аноде и катоде и струјно напонске карактеристике ГГС.

Тип ГГС	Анодна реакција	Катодна реакција	Материјал аноде	Материјал катоде	Напон V	Струја $\text{mA cm}^{-2}$
ПЕФЦ	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	C/Pt(M)	C/Pt(M)**	0,70-0,80	500-600
АФЦ	$\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}$	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} \rightarrow 4\text{OH}^-$	Pt/ Pd Ni	Au/Pt NiOOH	0,75-0,80	150-200
ПАФЦ	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}$	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	C/Pt	C/Pt	0,65-0,75	250-400
МЦФЦ	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}$	$\text{O}_2 + 2\text{CO}_2 + 4\text{e} \rightarrow 2\text{CO}_3^{2-}$	Ni/Cr	NiOOH	0,75-0,80	250-300
СОФЦ	$\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}$	$\text{O}_2 + 4\text{e} \rightarrow \text{O}^{2-}$	Ni-ZrO <sub>2</sub>	LaMnO <sub>3</sub>	0,65-0,70	400-500

\* M=Ru, Mo, W

\*\* M=Co, Ni, Fe, Cr

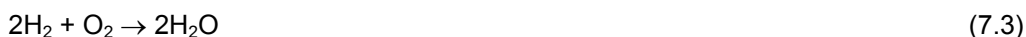
У табели 7.3 су сумарно дате предности, мане као и примена различитих типова ГГС.

Табела 7.3. Предности, мане и примена различитих типова ГГС.

Тип ГГС	Предности	Мане	Примена
АФЦ	висока напон, ефикасност	осетљиве на CO <sub>2</sub> ,	свемирска истраживања, војна
ПЕФЦ	висока густина струје, густина енергије и ефикасност	осетљиве на CO, катализатори на бази племенитих метала,	транспортирација, когенерација
ПАФЦ	технолошки најразвијеније	мала ефикасност, ограничен животни век, корозионо агресивне, катализатори на бази племенитих метала	производња енергије
МЦФЦ	висока густина енергије	кратак животни век, продукција CO <sub>2</sub> , нестабилност електролита нижа ефикасност	производња енергије, когенерација
СОФЦ	висока густина енергије, дуг радни век	висока радна температура, мала проводљивост електролита	производња енергије, когенерација

Као што се из табела 7.1-3 може видети, ПЕФЦ и ЦОФЦ по карактеристикама су нешто изнад осталих типова ГГС и као такве се разматрају у примени посредне акумулације електричне енергије.

Предпостављајући исте услове аутономног напајања електричном енергијом као и код акумулаторских батерија, ГГС би требао да обезбеди електричну енергију током 10 до 15 часова укупне енергије од 10kWh. Пошто је напон ГГС 0.7V, ГГС би требао да обезбеди ~14286Ah. Знајући да је теоријски специфични капацитет гасовитог водоника 26.8Ahg<sup>-1</sup>, и да је ефикасност ГГС ~60%, може се израчунати потребна маса водоника да би се обезбедила та енергија. Та маса износи ~900g, односно ~10000dm<sup>3</sup> водоника. Запремина кисеоника је дупло мања пошто водоник и кисеоник реагују у односу 2:1:



Са друге стране електролизер који би могао да обезбеди водоник и кисеоник у релативно кратком времену, од на пример 5h, према Фарадејевом закону:

$$m = It \frac{M}{nF} \quad (7.4)$$

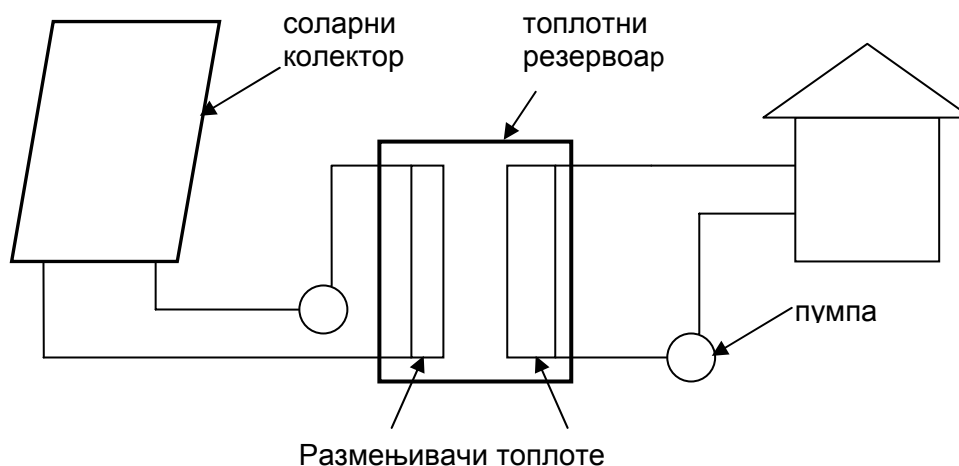
би требао да се напаја струјом од ~5000A при напону на ћелији од 2V. Са обзиром на то да би се као основни извор електричне енергије за електролизу воде користио ветрогенератор са напонам од 220V, струја би требала да износи око 50A.

Из свега горе изложеног види се да ГГС због своје компликованости и високих инвестиционих трошкова, не би могли да се користе као извор аутономног напајања за појединачно домаћинство или викенд куће. Са друге стране, у перспективи овај вид складиштења енергије би могао да буде значајан допунски извор енергије за мања насеља, уз примену више ветрогенератора, чиме би се смањили инвестициони трошкови инсталације ГГС.



## 7.2 Акумулација топлотне енергије

Као претварачи топлотне енергије сунчевог зрачења користе се соларни колектори, при чему се радни флуид током циркулације загрева и даље користи. Проблем са применом соларних колектора је што могу радити само током дана, па је неопходна акумулација топлотне енергије која би се користила у периодима када је осунчаност мала или током ноћи. У ту сврху се користе размењивачи топлоте у којима примарно загрејани медијум у соларном колектору преко размењивача топлоте предаје енергију акумулационом медијуму у акумулатору топлотне енергије (бојлеру), слика. Као акумулациони медијум се обично користи вода која има мали топлотни капацитет и промену температуре током хлађења. Из тог разлога погодније је користити органске и хидратисане неорганске супстанце које имају високу латентну топлоту топлјења, значајно већи топлотни капацитет него вода, а током очвршћавања задржавају температуру у уском интервалу до промене фазног састава.



Слика 7.6. Шематски приказ акумулатора топлотне енергије

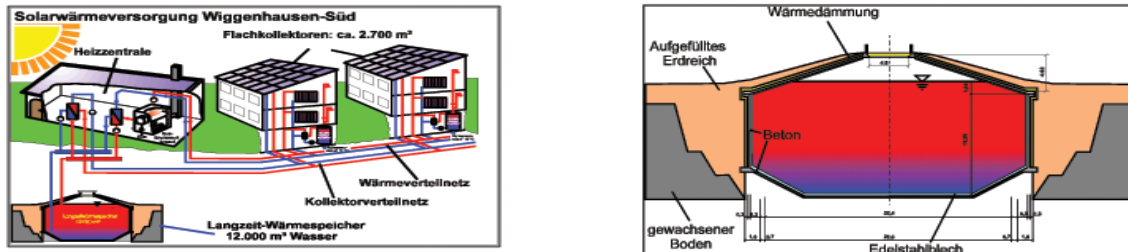
У табели 7.4 су дате неке органске и неорганске супстанце које би се потенцијално могле користити у сврху акумулације топлотне енергије.

Табела 7.4 Латентна топлота топлјења и температура прелаза у течно стање различитих органских и неорганских једињења

Једињење	Прелазна температура, °C	Латентна топлота Whkg <sup>-1</sup>
Калцијум-хлорид	27-30	50
Натријум-сулфат	32	70
Магнезијум-нитрат	89	45
Парафин	62-64	48-53
Нафталин	80	-
Палмитинска-киселина	63	52

Топлотни резервоари се могу произвести од различитих пластичних материјала и неопходно их је закопати у земљу ради топлотне изолације. Овако акумулисана топлота се по потреби може користити за различите намене, при чему се акумулисана топлота користи за загревање воде преко размењивача топлоте.

На слици 7.7 приказан је систем соларног грејања и танк за дугорочно чување топлоте који је изграђен у соларном насељу Фридрихсхафена (City-RES, 2002)



Слика 7.7 Танк за дугорочно чување топлоте, изграђен у једном насељу Фридрихсхафена (Немачка)

Леви део слике шематски приказује читав систем, а десни део приказује танк за акумулирање топлоте. Пречник танка је 30м а дубина 12м.

У поменутом насељу, на крововима вишеспратних зграда инсталирано је око 4300m<sup>2</sup> соларних колектора. Вода загрејана од Сунца у току лета, до температуре 40-90<sup>0</sup>, делимично се одмах користи у домаћинствима, а вишак се шаље у танк у коме се чува до зимских месеци. У току зиме вода се користи (уз евентуално догревање) за грејање станова и за употребу у домаћинствима. Циљ овог пројекта је да се покрије око 50% укупних потреба за топлим водом и грејањем простора у блоку од 570 станова.